# VULNERABILIDAD SISMICA DE LAS CIUDADES DEL NORTE DE CHILE: ARICA, ANTOFAGASTA Y COPIAPO

Patricio Tapia G.[1], Walter Roldán L.[1], Carlos Villacis.[2]

1 Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
2 GeoHazard International
Palo Alto, California, EEUU

## RESUMEN

Aplicando la metodología adquirida durante el desarrollo del proyecto RADIUS para la ciudad de Antofagasta en 1998, se desarrollaron estudios tendientes a evaluar la vulnerabilidad sísmica de todas las ciudades de la zona norte de Chile. Evaluando la sismicidad de cada zona se pudo establecer el sismo más probable de ocurrir, y sus efectos en cada localidad. Mediante el establecimiento de curvas de vulnerabilidad para los distintos tipos estructurales presentes en cada ciudad y el correspondiente catastro de edificación, se estableció el nivel de daño debido a un sismo usando un Sistema de Información Geográfico. El escenario sísmico resultante puede usarse por planificadores locales, con el objeto de proyectar ciudades más seguras sísmicamente.

## SUMMARY

With the application of the methodology acquired during the RADIUS Project developed in Antofagasta in 1998, several studies with the objective of assessing the seismic vulnerability of the Chilean northern cities were carried out. By establishing the seismicity for each zone, the greatest possible earthquake was determined and its effects over the cities were assessed. By using both vulnerability curves for different structural types and census information for each zone, the level of damage was established taking advantage of the Geographical Information System tools. The seismic scenario obtained can be used by local planners in the development of safer cities from the seismic point of view.

## INTRODUCCIÓN

En el año 1998 y bajo la iniciativa del Secretariado para la Prevención de Desastres Naturales (IDNDR), dependiente de las Naciones Unidas, se llevó a cabo el proyecto RADIUS (Risk Asssesment Diagnosis Urban System Tools) en 9 diferentes ciudades del planeta. Estas ciudades fueron escogidas de un total de 52, entre las cuales se encontraban Antofagasta y Santiago por Chile. Dentro de las nueve ciudades seleccionadas, se encuentran 3 de América Latina: Tijuana (México), Guayaquil (Ecuador) y Antofagasta (Chile). El proyecto consistió en estudiar la vulnerabilidad sísmica de las ciudades bajo la ocurrencia de un terremoto severo, mediante la determinación de un escenario sísmico, que permitiera sentar las bases para la elaboración de un plan de acción para la prevención y mitigación de los daños que un sismo de gran magnitud puede provocar (Ref. 1).

Este estudio contó con la participación de destacados académicos de las Departamentos de Ingeniería Civil y Geología de la Universidad Católica del Norte y el apoyo técnico de expertos internacionales, bajo la supervisión de GeoHazard International. Aparte del financiamiento proveniente de las Naciones Unidas, se contó con un aporte del Gobierno Regional a través de la Intendencia Regional y la entonces OREMI (hoy DIREMER).

Una de las razones que tuvo la IDNDR para elegir a la ciudad de Antofagasta para la realización de este proyecto fue el hecho que la ciudad representaba un posible foco de expansión de los estudios, ocupando la misma metodología. Fue por esta razón que el departamento de Ingeniería Civil se propuso la tarea de evaluar la vulnerabilidad sísmica de todas las ciudades del Norte de Chile, para lo cual se han desarrollado estudios en Arica, Iquique, Tocopilla, Calama, Mejillones y Copiapó, aparte del correspondiente realizado en el marco del proyecto RADIUS para Antofagasta. En todas ellas se ha aplicado la misma metodología, proporcionada por GeoHazard International, la que se puede resumir en los siguientes pasos:

- Determinación del sismo de control, de acuerdo a la historia sísmica de la región afectada
- Determinación de los aspectos geológicos y geotécnicos del sitio de análisis, para la caracterización del suelo desde el punto de vista sísmico
- Determinación de las intensidades sísmicas provocadas por el sismo de control en un determinado lugar (ciudad), usando relaciones de atenuación y el estudio geotécnico.
- Desarrollo de un catastro de construcción con el objetivo de determinar los tipos estructurales predominantes
- Determinación de las curvas de vulnerabilidad para cada tipo estructural de la ciudad, con el objeto de obtener el daño final sobre las edificaciones.
- Establecimiento de un escenario sísmico utilizando un Sistema de Información Geográfico, para la elaboración de un Plan de Acción

Como una forma de mostrar el resultado de estos estudios, se ha elegido presentar los casos de las ciudades de Antofagasta, Arica y Copiapó por ser las ciudades más importantes del norte de Chile (Refs. 2, 3 y 4). El detalle de los procedimiento se hace a continuación, con los comentarios adecuados para cada situación específica de las ciudades.

## DETERMINACIÓN DEL SISMO DE CONTROL

Haciendo una recopilación de todos los estudios de sismicidad efectuados hasta la fecha, ya sea por autores chilenos o extranjeros (Ref. 5, 6, 7), se pudo establecer para cada zona de interés, la magnitud y la ubicación del sismo más probable. Cabe hacer notar que no es un misterio la inminente ocurrencia de un terremoto de grandes proporciones en el norte del país y así lo han expresado varios autores. En esta etapa no se trató de hacer nuevos estudios, sino que más bien de realizar un análisis bibliográfico tendiente a justificar la magnitud y la ubicación más probable del sismo, para cada una de las zonas analizadas.

En la Fig. 1 se muestra la gráfica espacio temporal para el norte grande del país, las que fueron utilizadas para las ciudades de Antofagasta y Arica. En ellas se puede apreciar que la historia sísmica de la región está fuertemente influenciada por la ocurrencia del los grandes eventos de 1868 y 1879. Se establecieron algunas zonas de mayor potencial sísmico, entre las que destacan las

regiones entre los paralelos 16 y 19 S y 20 y 22 S. Para la zona de Copiapó se utilizaron además los estudios de Comte (Ref. 8), los que indicaron una zona potencial de ruptura entre los paralelos 27 y 29 S.

Para la zona de Arica finalmente se decidió considerar la región limitada por los paralelos 18 y 19, ya que considera una madurez sísmica que indicaría la inminencia de un sismo de grandes proporciones. Este sismo afectaría con importantes consecuencias no solo a la ciudad de Arica sino que también a Iquique y Tocopilla. Para la zona de Antofagasta se consideró la región entre los paralelos 20 y 22 sur. Pueden considerarse otras zonas como potenciales productoras de sismos fuertes, sin embrago el Método Determinístico utilizado para la determinación del sismo de control considera, entre otras cosas, el potencial destructivo que puede tener éste debido a la cercanía al centro urbano que es objeto de análisis. El detalle de los sismos seleccionados se indica en Tabla 1.

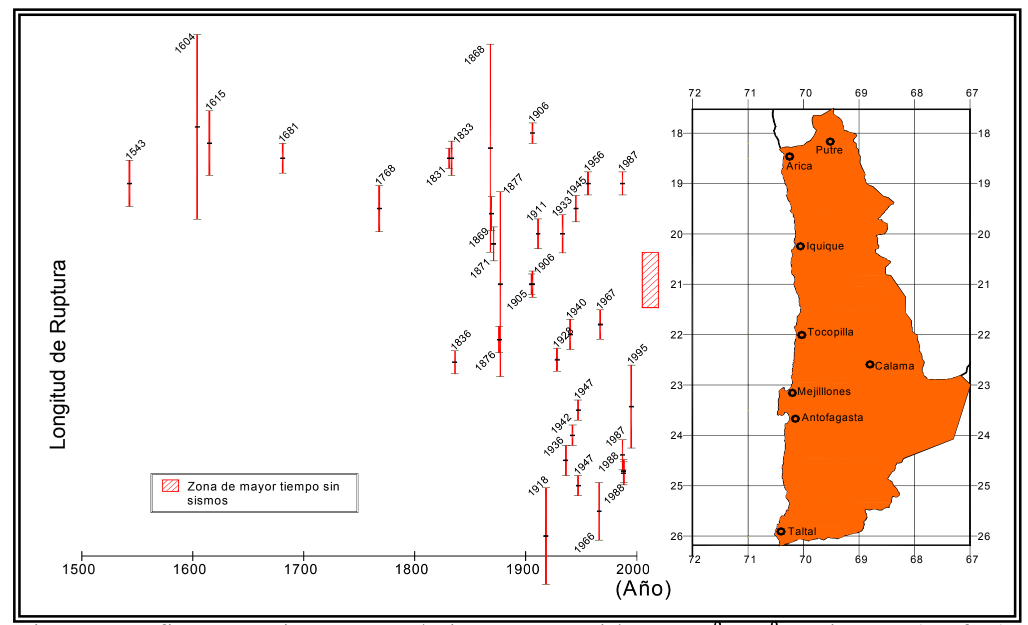



Fig.1.- Gráfica espacio temporal sismos ocurridos en 1ª y 2ª regiones (Ref. 5)

Tabla 1.- Parámetros de los sismos de control considerados

| Localidad | Magnitud (Richter) | Distancia Epicentral (km) | Profundidad (km) |
|---|---|---|---|
| Antofagasta | 8.3 | 150 | 36 |
| Arica | 8.5 | 105 | 30 |
| Copiapó | 8.0 | 80 | 45 |

## CARACTERIZACIÓN SISMICA DEL SUELO LOCAL

De los extensos estudios geológicos y otros menores del punto de vista geotécnico existentes en la región, se caracterizaron las condiciones de sitio de cada lugar. Los suelos fueron separados de acuerdo a su diferente comportamiento sísmico. Entre los parámetros considerados están la densidad, granulometría, compacidad y potencia (profundidad de la roca basal). Para uniformar los criterios y ser consecuentes con la clasificación que posteriormente sería utilizada para establecer el

nivel de intensidad de cada suelo, éstos fueron catalogados como: roca, arena densa, arena suelta y eventualmente material arcilloso o con presencia de algún material que provoque alguna inestabilidad.

De la Ref. 9, estudio reciente en la ciudad de Antofagasta, se pudo establecer la clasificación geotécnica que se muestra en la Fig. 2a. Este estudio obedeció a la exploración y ensayo de muestras de diferentes pozos dentro de la ciudad, con profundidades que variaron entre 1.5 y 3 m. La zonificación geotécnica de las ciudades de Arica y Copiapó tienen un grado mayor de sesgo ya que no existía a la fecha de realización de este estudio, una investigación formal que caracterizara desde el punto de vista sísmico a estos suelos. Se procedió a revisar toda la información existente en los organismos públicos y universidades, a través de sus respectivos laboratorios, llegando a establecer las configuraciones geotécnicas que se muestran en las figuras 2 b) y 2 c) para Arica y Copiapó respectivamente.

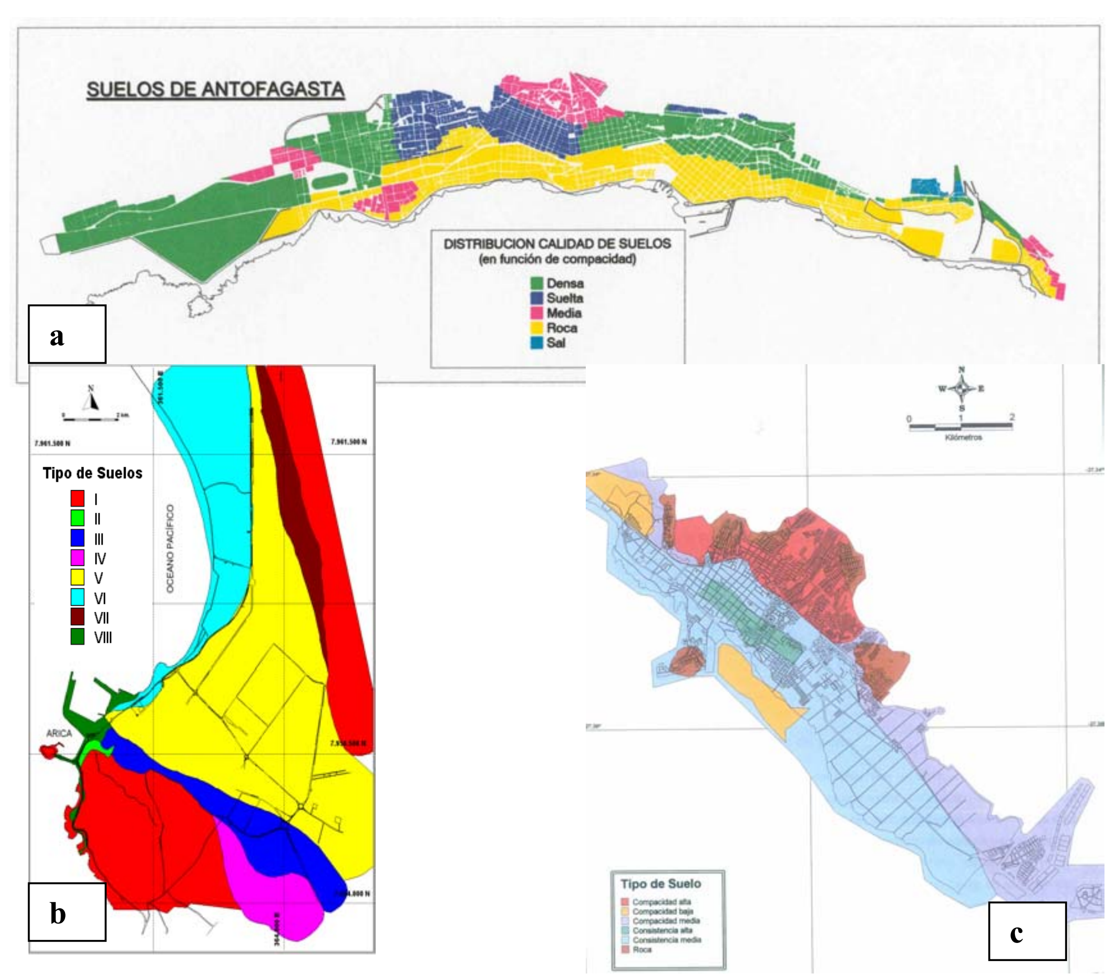


Fig. 2.- Distribución de suelos para (a) Antofagasta, (b) Arica y (c) Copiapo

## DETERMINACIÓN DE LAS INTENSIDADES SÍSMICAS

La determinación de las intensidades sísmicas siguió dos pasos fundamentales: (1) el estudio del efecto del terremoto de control en el sitio de análisis para un suelo patrón y (2) el estudio de la amplificación sísmicas para otros tipos de suelos en el sitio, a partir del suelo patrón.

Mediante las expresiones de Barrientos (Ref. 10) y otros autores, se logró establecer la intensidad del movimiento en el suelo patrón, que en este caso se consideró como roca. Dicha intensidad de movimiento se evaluó preliminarmente en función de la aceleración máxima (PGA), para posteriormente extrapolarla a la Intensidad Modificada de Mercalli.

Para establecer la intensidad de movimiento para los otros tipos de suelos, se recurrió a las expresiones dadas por las Disposiciones del NEHRP 1997 (Ref. 11), el cual considera una amplificación en función de espectros de respuestas, ya sea para período corto como para período largo y la clasificación por calidad de los suelos. La Tabla 2 muestra la clasificación de suelos original del NEHRP 1997, la que es función de las velocidades de ondas de corte medidas y la Tabla 3, los correspondientes factores de amplificación. Para evaluar la respuesta espectral para período corto, se utilizó el acelerograma del sismo de Antofagasta de 1995, para el cual se desarrolló el correspondiente espectro de respuesta.

Tabla 2 .- Clases de Suelos (según las Disposiciones NEHRP 1997)

| Clase | Descripción de la Clase | Velocidad de Onda de Corte (m/s) | |
|---|---|---|---|
| | | Mínima | Máxima |
| A | ROCA DURA | 1500 | |
| B | ROCA | 760 | 1500 |
| C | SUELO MUY DENSO-ROCA BLANDA<br>Esfuerzo de corte no drenado $u_S$>2000 psf ($u_S$ ≥100 Kpa) o N ≥ 50 golpes/ft | 360 | 760 |
| D | SUELO RÍGIDO<br>Suelo rígido con esfuerzo de corte no drenado 1000 psf ≤ $u_S$ ≤ 2000 psf<br>(50 Kpa ≤ $u_S$ ≤ 100 KPa) o 15 < N < 50 golpes/ft | 180 | 360 |
| E | SUELO BLANDO<br>Perfiles con más de tres metros de arcilla blanda definida como suelo con índice de plasticidad IP > 20, contenido de humedad w > 40% y esfuerzo de corte no drenado $u_S$< 1000 psf (50 KPa) (N < 15 golpes/ft) | | 180 |
| F | SUELO QUE REQUIERE EVALUACION ESPECIFICA | | |

Tabla 3.- Factores de Amplificación del Suelo (según las Disposiciones NEHRP 1997)

| Aceleración Espectral del Suelo Clase B | Clase del Suelo | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| Periodo Corto, $S_{AS}$ (g) | Factor de Amplificación de Periodo Corto, $F_A$ | | | | |
| ≤ 0.25 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.6 | 2.5 |
| 0.50 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.7 |
| 0.75 | 0.8 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.2 |
| 1.0 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 0.9 |
| ≥ 1.25 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.8 |

Puede apreciarse que la clasificación original del NEHRP 1997 se relaciona bastante bien con las caracterización geotécnica que se llevó a cabo en todas las ciudades. La aplicación de esta metodología entrega la aceleración máxima para cada tipo de suelo, usando el factor de

amplificación correspondiente. Posteriormente esta aceleración máxima se relaciona con la Intensidad Modificada de Mercalli, para definir el plano de intensidades.

**Efectos Colaterales.-** Con el objeto de considerar otras variables en la amplificación de los daños sísmicos, se desarrolló un estudio tendiente a evaluar el potencial de deslizamiento de algunos taludes de cerro, los que se presentan en las mayoría de las ciudades costeras de Chile, debido a la cercanía de la Cordillera de la Costa. Esto fue especialmente importante para el caso de la ciudad de Arica, ya que el Morro representa siempre un factor de riesgo para la ciudad. Se establecieron zonas con diferentes potenciales de deslizamiento, desde el severo hasta el leve, lo que permitió modificar el plano de intensidades en función de este riesgo colateral.

El resultado final de este proceso son los planos de intensidades que se muestran en las Fig. 3 a) y b) para Arica y Copiapó

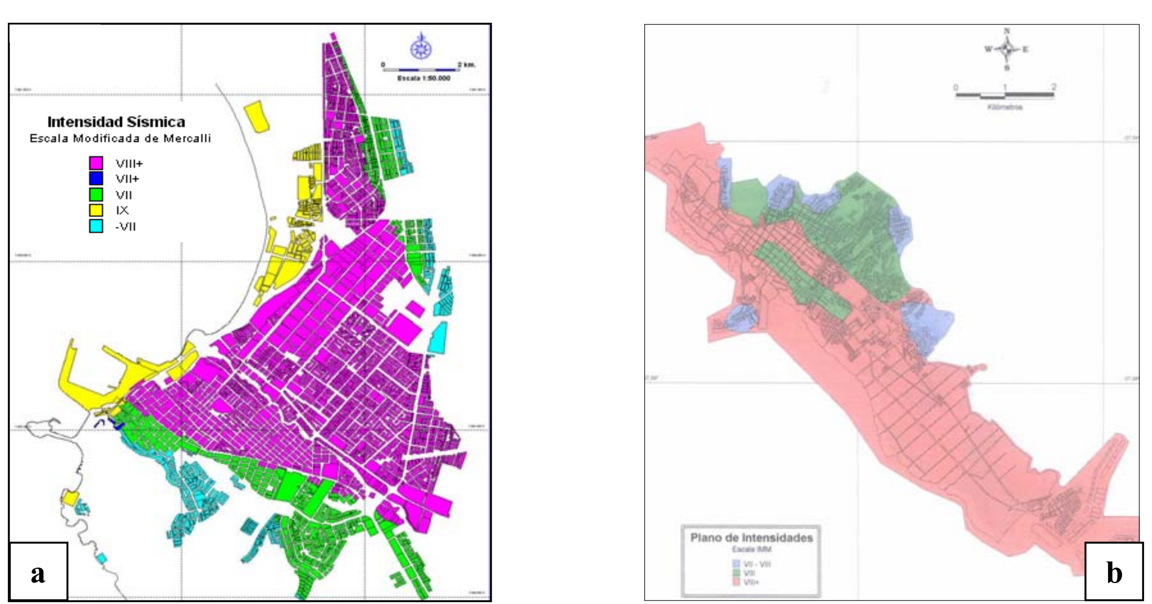


Fig. 3.- Plano de intensidades sísmicas para (a) Arica y (b) Copiapó

## DESARROLLO DE UN CATASTRO DE EDIFICACION

Para establecer el nivel de daño producto de un sismo severo, se desarrolló un catastro de la construcción en cada una de las ciudades. Esto implicó establecer en un Sistema de Información Geográfico (SIG), los tipos estructurales predominantes por manzana en cada localidad. Esto correspondió a un arduo trabajo de terreno, que consistió en evaluar estructuralmente la configuración de las edificaciones, para luego establecer la importancia relativa de cada tipo estructural por manzana. Este trabajo fue apoyado por información del censo del año 1992, la que fue incorporada al SIG. De este ultimo también se pudieron establecer parámetros demográficos que fueron de utilidad a la hora de establecer el porcentaje de la población que sería afectada en mayor y menor grado debido a la ocurrencia de un sismo.

De un análisis preliminar catastral se establecieron los tipos estructurales predominantes. Cabe hacer notar que estos son en su mayoría los mismos en cada localidad, presentando leves

diferencias en aquellos tipos más antiguos, que recogen la cultura constructiva de cada región. La tabla siguiente muestra los tipos estructurales predominantes para la ciudad de Antofagasta:

Tabla 4.- Tipos estructurales predominantes en la ciudad de Antofagasta

| **Tipo estructural** | **Código** | **Descripción** |
|---|---|---|
| Autoconstrucción | ACON | Representa a la construcción realizada sin control profesional y usando materiales sin un adecuado control de calidad y dudosa procedencia |
| Hormigón con madera | HMAD | Tipo Estructural antiguo que mezcla hormigón con pié derecho y diagonales de madera en muros |
| Albañilería simple | ASIM | Tipo Estructural compuesto por muros de bloques de hormigón de baja calidad y sin refuerzo adicional |
| Albañilería estructural (reforzada) | AERa | Tipo Estructural compuesto por muros de albañilería de bloques o ladrillos, enmarcado por pilares y cadenas de hormigón armado (de uno a tres pisos) |
| Albañilería estructural (reforzada) | AERb | Tipo Estructural compuesto por muros de albañilería de bloques o ladrillos, enmarcado por pilares y cadenas de H.A. (de cuatro a ocho pisos) |
| Hormigón y otro material | MHMY | Tipo Estructural compuesto por muros de corte, de una mezcla de hormigón y yeso |
| Hormigón Armado | MHAR | Tipo Estructural compuesto por muros de hormigón armado de acuerdo a Nch430 o ACI318 |

Las Figs. 4 a), b) y c) muestran la distribución de estos tipos estructurales en cada una de las ciudades, utilizando el SIG.

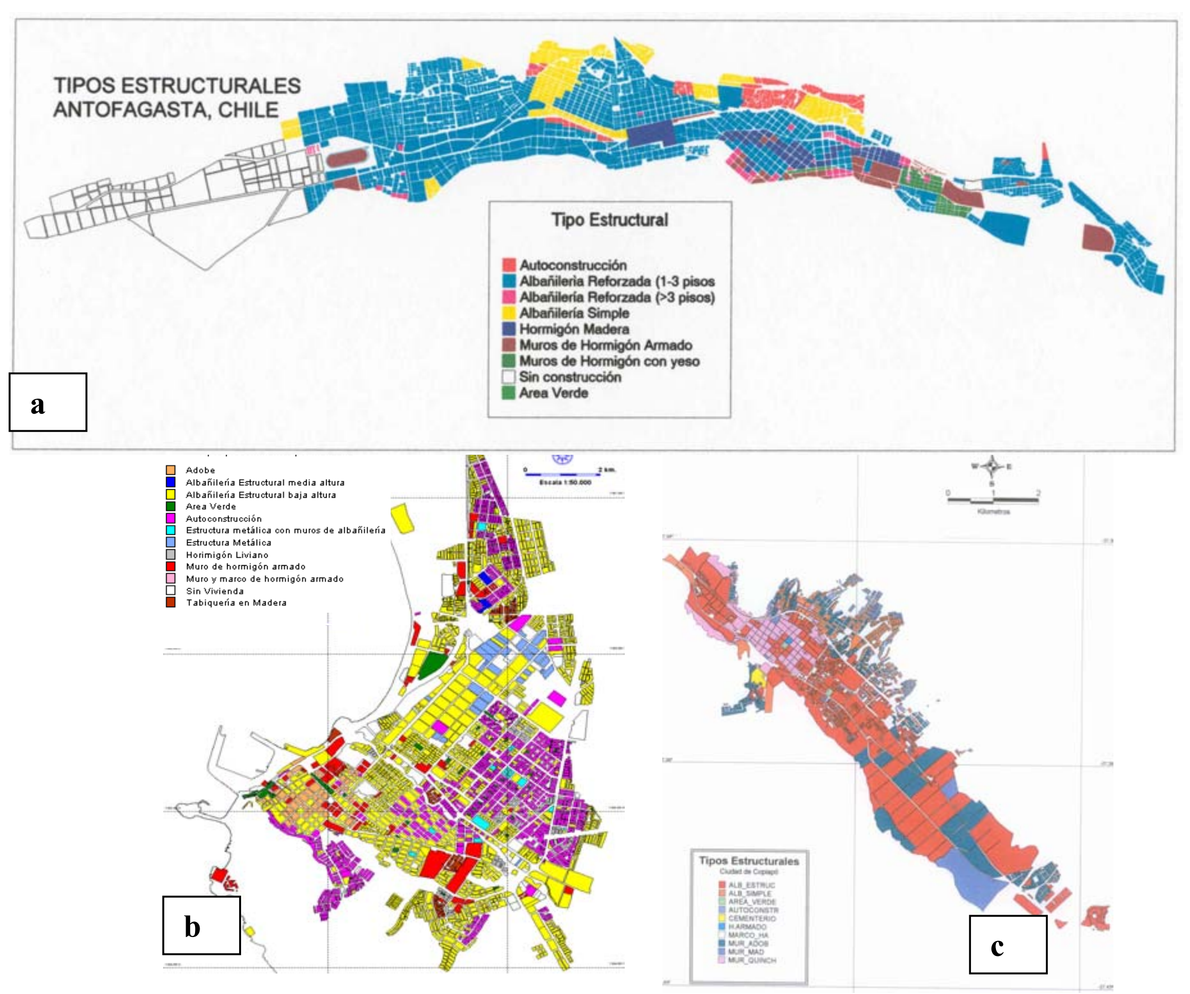



Fig.4.- Distribución de tipos estructurales en a) Antofagasta, b) Arica y c) Copiapó.

## DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE VULNERABILIDAD

Para determinar finalmente el daño sobre las estructuras es necesario analizar la vulnerabilidad de ellas. Esto se puede hacer mediante el establecimiento de las denominadas curvas de vulnerabilidad. Este tipo de curvas puede obtenerse mediante al menos tres procedimientos:

**Método teórico**, que consiste en establecer la respuesta teórica de un tipo estructural, considerando su comportamiento real inelástico, bajo la acción de un sismo real y contrastando los resultados con ensayos de laboratorio a escala real.

**Sistema Experto**, mediante la consulta a expertos cuya experiencia previa en daños y movimientos sísmicos permitiría extrapolar daños para eventos futuros de mayor intensidad.

**Método estadístico**, a través de los daños observados en terremotos pasados y el establecimientos de planos de distribución de intensidades.

Debido a la escasez de información estadística con que se contaba para cada una de las localidades a la fecha del estudio y al hecho que un estudio teórico involucraría un tiempo considerable, se optó por adaptar curvas de vulnerabilidad que se habían confeccionado para la ciudad de Santiago (Ref. 12). Estas curvas se realizaron considerando estadísticas de daños del terremoto del 3 de Marzo de 1985 en la zona central y tomó en cuenta los tipos estructurales más comunes del país. Debido a que las curvas de vulnerabilidad son curvas de daños promedio, y por lo general las estructuras que son objetos de análisis por las aseguradoras (que fue el gran proveedor de la información catastral de daños para dicho estudio) son exclusivamente aquellas que sufrieron daño efectivo, esta curvas deben considerarse sólo como aproximaciones.

La Fig. 5 muestra las curvas de vulnerabilidad para cada tipo estructural considerado en la ciudad de Antofagasta. Se debe notar que las curvas pueden tener cierta variación entre localidades, aun cuando correspondan a los mismos tipos estructurales, ya que se hicieron ajustes locales respecto a las originales de la zona central, tomando en consideración aspectos tales como mano de obra, materiales y control de calidad.

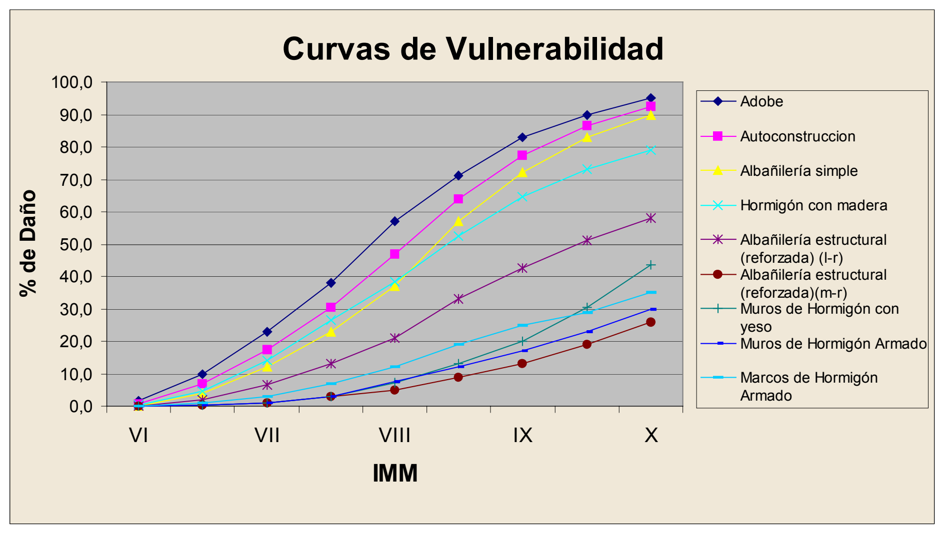



Fig. 5.- Curvas de vulnerabilidad para cada tipo estructural (Antofagasta)

## ESTABLECIMIENTO DE UN ESCENARIO SISMICO

El escenario sísmico de daños se puede establecer realizando la intersección digital de la distribución de tipos estructurales predominantes por manzana (Fig. 4 a), b) y c)) con las curvas de vulnerabilidad por tipo estructural. Esta intersección la realiza el software del Sistema de Información Geográfico, ya que es una excelente herramienta para todos aquellos fenómenos que tienen que ver con el territorio y manejo de datos espaciales.

Las Fig. 6 a), b) y c) muestran los resultados finales de daños. Se puede apreciar que esta información es vital para la planificación territorial futura y el establecimiento de un plan de acción para actuar no sólo en la emergencia sino que también en la mitigación de los efectos de un terremoto.

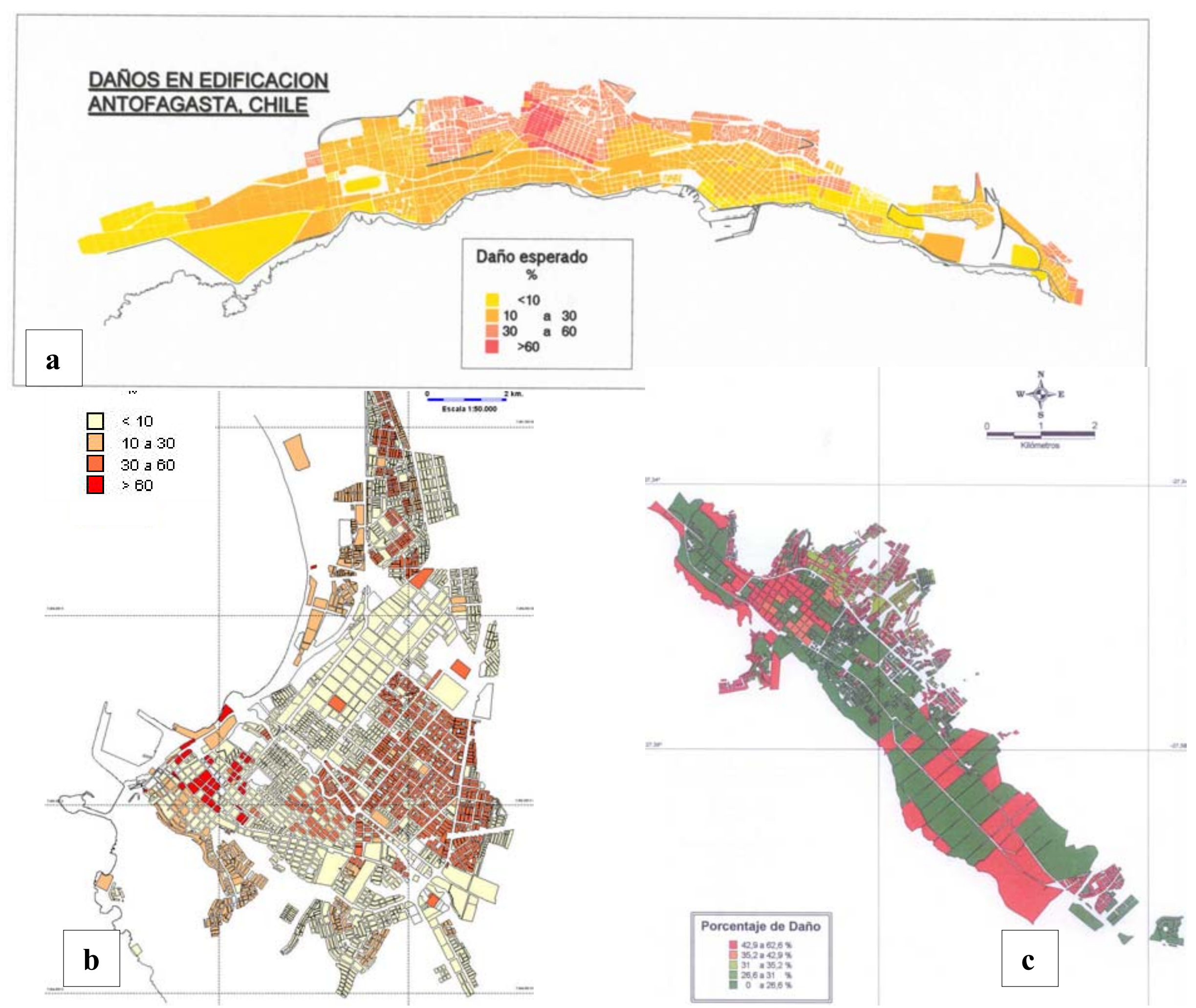



Fig., 6.- Escenario de daños a) Antofagasta, b) Arica y c) Copiapó

## CONCLUSIONES

Los estudios de vulnerabilidad sirven para establecer el grado de seguridad que presentan las ciudades frente a la ocurrencia de un evento sísmico de proporciones. Esta seguridad se puede

establecer a nivel de daños en estructuras como en líneas vitales, servicios esenciales e infraestructura de transporte.

La aplicación de la metodología adquirida en el desarrollo del proyecto RADIUS para la ciudad de Antofagasta, permitió establecer escenarios de daños para otras ciudades del norte del país, que tiene un riesgo igual o mayor de sufrir los embates de un fenómeno sísmico.

Los planos finales de un estudio de vulnerabilidad entregan herramientas importantes a planificadores urbanos (municipalidades) y sistema de emergencia (bomberos, DIREMER). Mapas de este tipo pueden influir inclusive en planos reguladores, ya que la variable de riesgo sísmico debe estar presente en cualquier plan de crecimiento de las ciudades.

## REFERENCIAS


1. Tapia, P. Roldán, W., Bembow, M., Pereira, M., Carvajal, M., *"Proyecto RADIUS (Herramientas de Evaluación para el Diagnóstico de Zonas Urbanas Ante Desastres Sísmicos)– Antofagasta, Chile"*. U. Católica del Norte. Antofagasta, Chile. 1999.
2. Tapia P., Iratchet, P., *"Vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Antofagasta, desde el punto de vista de las estructuras y los servicios esenciales",* memoria para optar al título de Ing. Civil. Depto de Ing. Civil, U. Católica del Norte, Antofagasta, 2000
3. Tapia P., Rojas, D., *"Vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Arica",* memoria para optar al título de Ing. Civil. Depto. de Ing. Civil, U. Católica del Norte, Antofagasta, 2000
4. Tapia P., Devia, G., Roldán, W., *"Vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Copiapó",* memoria para optar al título de Ing. Civil. Depto. de Ing. Civil, U. Católica del Norte, Antofagasta, 2000
5. Campo J., Compte D. *"Distribución espacio-temporal del régimen de esfuerzos en el sur del Perú y Norte de Chile. Evidencias de una etapa de madurez terminal de un ciclo sísmico".* Sextas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Santiago, Chile. 1990.
6. Comte D., Alfredo Eisenberg y Mario Pardo *"Sismicidad y riesgo sísmico en el margen occidental de Sud-América entre los 16°-22° Sur*". Quinto Congreso Geológico Chileno. Santiago, Chile. Agosto 1988.
7. Comte D., Pardo M., Eisenberg A. *"Análisis cuantitativo de los grandes terremotos del norte grande de chile y sur del Perú: Estimación del peligro sísmico".* Sextas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisismica. Santiago, Chile.1990.
8. Comte, D. Monfret, T, *"Sismotectónica de Copiapó, norte de Chile, utilizando redes sismológicas terrestres y submarinas",* Informe de Trabajo de Campo del proyecto FONDECYT N°1981145
9. Aguilera, M., *"Zonificación Geotécnica de la ciudad de Antofagasta",* Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile (1995).
10. Barrientos P., Sergio. *"Regionalización sísmica de Chile",* Memoria para optar al grado de Magister en ciencias con mención en Geofísica. Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 1980.
11. *HAZUS, Manual técnico*. Preparado por National Institute of Buldings Sciences for Federal Emergency Management Agency.
12. Astroza, M., Aravena, M., Monge, J. *"Tablas de vulnerabilidad para algunos tipos constructivos".* Quintas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Santiago, Chile. Julio 1989.